

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN TOTAL DE ENERGÍA SOLAR DE FACHADAS VIDRIADAS CONSTITUIDAS POR DOBLE VIDRIADO HERMÉTICO

V. L. Volantino, E. J. Cornejo Siles, A. O. Pereyra
 Unidad Técnica Habitabilidad Higrotérmica, INTI Construcciones
 Av. Gral. Paz 5445, San Martín, Prov. Buenos Aires, ARGENTINA
 Telefax: (5411) 4753-5784 / 4754-4065
 e-mail:

RESUMEN: Para el análisis de la eficiencia energética de un edificio se requiere del conocimiento de entre otros, la componente solar incidente que ingresa al mismo a través de los elementos vidriados. Existen métodos de cálculo, pero para determinarlo experimentalmente se utilizó una cámara de ensayos de 10 por 10 metros sobre la que se instaló una fachada vidriada. Se efectuaron mediciones de irradiación solar total incidente tanto sobre plano horizontal como vertical, también la irradiación solar reflejada y la transmitida durante el mes de agosto de 2009. Se debió realizar una selección de los datos a utilizar para obtener relaciones constantes representativas de la transmitancia y reflectancia solar del elemento vidriado, en un intervalo de tiempo definido. Se establece un método de medición que permite determinar las componentes solares bajo ciertas condiciones del día de medición que debe ser diáfano, orientación establecida e intervalo de máximos valores coincidentes.

Palabras clave: fachada vidriada, irradiancia solar, reflectancia, transmitancia solar, intervalo de tiempo.

INTRODUCCION

El consumo energético en los edificios en la actualidad es una condición de análisis prioritario, siendo importante conocer la carga térmica solar a través de los elementos vidriados para el cálculo de acondicionamiento térmico. Actualmente, se utilizan tablas y métodos de cálculo teórico para su estimación, que generalmente no son datos de origen nacional, por lo que se desarrolló una metodología que permite evaluar el comportamiento energético de los elementos vidriados mediante mediciones in-situ.

Para efectuar los cálculos teóricos correspondientes, es necesario en primer lugar, medir las variables espectrales transmitancia $\tau(\lambda)$ y reflectancia $\rho(\lambda)$ de un cuerpo no opaco, con lo cual se hace indispensable contar con un equipo adecuado que realice dichas mediciones. Tal equipo es un espectrofotómetro de doble haz, con esfera integradora, que cubra el rango UV - Vis - NIR (240 - 2600 nm) y construido según Norma ISO 9002. Luego, se obtienen analíticamente la transmitancia (τ_e) y la reflectancia (ρ_e) a la radiación solar, de acuerdo con las expresiones dadas en la Norma ISO 9050:2003:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} \tau(\lambda) \times S_\lambda \times \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda \times \Delta\lambda} \quad (1)$$

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} \rho(\lambda) \times S_\lambda \times \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S_\lambda \times \Delta\lambda} \quad (2)$$

donde, S_λ es la distribución espectral relativa de la radiación solar directa y $\Delta\lambda$ es el intervalo de longitud de onda. El producto $S_\lambda \cdot \Delta\lambda$ está tabulado en la normativa mencionada para una masa de aire igual a 1,5. Por otra parte, $\lambda=300$ nm y $\lambda=2500$ nm corresponden a los valores de longitud inicial y final del espectro solar, respectivamente.

La absorbancia a la radiación solar (α_e) se halla según la siguiente relación:

$$\alpha_e = 1 - \tau_e - \rho_e \quad (3)$$

La parte absorbida $\alpha_e \cdot \phi_e$ se subdivide en dos partes $q_i \cdot \phi_e$ y $q_e \cdot \phi_e$, que representan las energías transferidas al interior y al exterior, respectivamente, siendo:

$$\alpha_e = q_i + q_e \quad (4)$$

Donde, q_i es el factor de transferencia de calor secundario desde el elemento vidriado hacia el interior y q_e el correspondiente hacia el exterior.

Para el caso de doble vidriado hermético, el factor q_i se determina mediante la expresión:

$$q_i = \frac{\left(\frac{\alpha_{e1} + \alpha_{e2}}{h_e} + \frac{\alpha_{e2}}{\Lambda} \right)}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{\Lambda} \right)} \quad (5)$$

siendo:

- ✓ h_e y h_i , los coeficientes de transmisión de calor superficiales o por convección, de las caras externas e internas del panel, respectivamente.
- ✓ Λ es la conductancia térmica del panel doble vidriado entre las caras exterior e interior del mismo.
- ✓ α_{e1} , es la absorbancia solar directa del paño exterior y α_{e2} , la del paño interior, las que se calculan mediante las expresiones siguientes:

$$\alpha_{e1} = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} \left\{ \alpha_1(\lambda) + \frac{\alpha'_1(\lambda) \cdot \tau_1(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda)}{1 - \rho'_1(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda)} \right\} S(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S\lambda \times \Delta\lambda} \quad (6)$$

$$\alpha_{e2} = \frac{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} \left\{ \frac{\alpha_2(\lambda) \cdot \tau_1(\lambda)}{1 - \rho'_1(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda)} \right\} S(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300\text{nm}}^{2500\text{nm}} S\lambda \times \Delta\lambda} \quad (7)$$

siendo,

- $\tau_1(\lambda)$ y $\tau_2(\lambda)$, las transmitancias espectrales del paño exterior e interior del DVH,
- $\rho_1(\lambda)$, la reflectancia espectral del paño exterior medido en la dirección de la radiación incidente,
- $\rho'_1(\lambda)$, la reflectancia espectral del paño exterior medido en la dirección opuesta a la radiación incidente,
- $\rho_2(\lambda)$, la reflectancia espectral del paño interior medido en la dirección de la radiación incidente,
- $\alpha_1(\lambda)$, la absorbancia espectral del paño exterior medido en la dirección de la radiación incidente, dado por:

$$\alpha_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho_1(\lambda) \quad (8)$$

$\alpha'_1(\lambda)$, la absorbancia espectral del paño exterior medido en la dirección opuesta a la radiación incidente, dado por:

$$\alpha'_1(\lambda) = 1 - \tau_1(\lambda) - \rho'_1(\lambda) \quad (9)$$

$\alpha_2(\lambda)$, la absorbancia espectral del paño interior medido en la dirección de la radiación incidente, dado por:

$$\alpha_2(\lambda) = 1 - \tau_2(\lambda) - \rho_2(\lambda) \quad (10)$$

La conductancia térmica Λ se determina para una diferencia de temperatura de 15°C a través del panel y a una temperatura media de la misma de 10°C.

Transmisión total de energía solar

La energía solar total transmitida hacia el interior de un local por unidad de área de elemento vidriado ϕ_{ei} está dada por la relación:

$$\phi_{ei} = \phi_e \times g \quad (11)$$

con ϕ_e el flujo de radiación solar incidente por unidad de área y g , la transmitancia total de energía solar del elemento vidriado. Los valores de ϕ_e se pueden obtener de tablas de datos meteorológicos confiables.

Cuando la temperatura del ambiente interior T_i difiere de la temperatura del aire exterior T_o , una transferencia de calor adicional debe considerarse sumada al valor de ϕ_e . Este flujo de calor adicional q_z se calcula como:

$$q_z = K. (T_o - T_i) \quad (12)$$

siendo K , el valor de transmitancia térmica del elemento vidriado.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Para la determinación de las propiedades óptico-solares de un elemento vidriado, se requiere según lo expresado en el punto anterior, el conocimiento de la radiación solar total incidente sobre el plano vertical de la fachada (I_v) y las correspondientes componentes reflejada (I_r) y transmitida (I_t) por el elemento vidriado también medidas sobre el plano vertical. Luego, efectuando la relación de cada una de éstas respecto de la radiación incidente, se hallan los respectivos valores de reflectancia y transmitancia solar de la fachada vidriada. Asimismo, se midió la irradiación solar total incidente sobre un plano horizontal (i_h), para tener una referencia de la característica que presentaba el día en cuestión.

Utilizando la ecuación (11) antes mencionada, tal como se encuentra definida en la Norma ISO 9050:2003, se puede escribir en función de las variables medidas durante la experimentación, como:

$$I_t = I_v \times T \quad (13)$$

es decir, la irradiación solar transmitida en función de la incidente, relacionadas a través de la energía solar transmitida hacia el interior de la fachada vidriada (T), lo que permite calcular a ésta última mediante el cociente:

$$T = I_t / I_v \quad (14)$$

Por otra parte, empleando el mismo criterio se puede establecer una relación similar tomando en cuenta la irradiación solar reflejada, para obtener la "reflectancia" R que presenta la cara externa de la fachada.

$$R = I_r / I_v \quad (14)$$

Para llevar a cabo esta determinación se experimentó sobre una fachada vidriada constituida por paneles de doble vidriado hermético (DVH), la que se montó en una cámara de ensayos emplazada en el Parque Tecnológico Miguelete del INTI. La cámara posee 10m de ancho por 10m de alto por 2m de profundidad con su cara anterior completamente abierta, en la que se ubica la citada fachada, de modo que la caja quede completamente cerrada y sellada. Si la fachada tiene menores dimensiones que la cara abierta de la cámara, como sucedió con este caso, se completa la superficie restante con cerramiento opaco. Por la disposición física que presenta la cámara de ensayos, el plano de la fachada a ensayar se encuentra ubicado en el cuadrante NO con una orientación de 67° con respecto del Norte.

Nota: La cámara de ensayos mencionada es producto de un Convenio firmado en el año 2006 entre el INTI y REPSOL YPF, con el objeto de construir una Nueva Cámara de Ensayo de Muros Cortina, que posibilitara la reproducción de las condiciones de diseño correspondientes a los distintos agentes climáticos, previstos en el diseño de un edificio, tales como, variaciones de temperatura, lluvia y presión del viento permitiendo evaluar el comportamiento de la fachada frente a estos agentes, desde el punto de vista de la seguridad estructural, confort y habitabilidad



Figura 1: Imagen satelital de la ubicación de la cámara de ensayos y su orientación

Se dispusieron además, sensores de temperatura (termocuplas de cobre constantán) superficiales en ambas caras del panel de DVH, y para dos posiciones diferentes, con el objeto de analizar la evolución térmica de la superficie interior de la fachada en función de la radiación solar recibida. También se midió la temperatura del ambiente interior de la cámara de ensayos a tres diferentes alturas, para evaluar el efecto de estratificación.

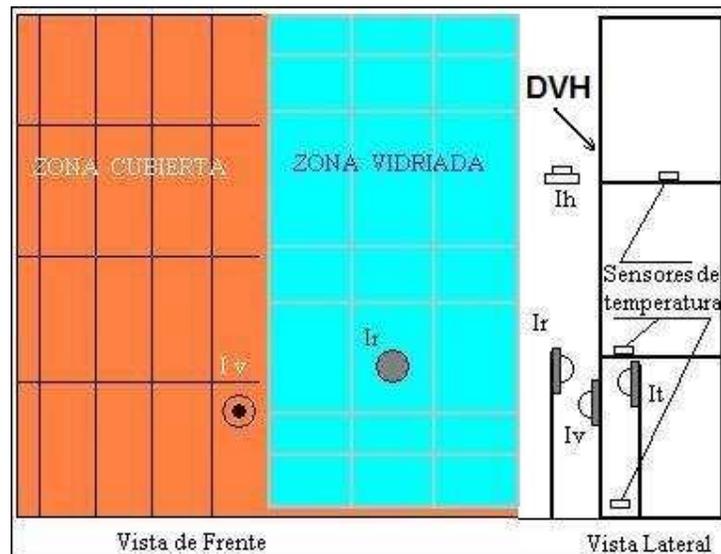


Figura 2: Esquema de la ubicación de sensores de radiación y temperatura

EQUIPAMIENTO

El equipamiento utilizado consiste de una cámara de 10m de ancho por 10m de alto por 2m de profundidad con su cara anterior completamente abierta, en la que se monta la fachada a ensayar, de modo que la caja quede completamente cerrada y se puedan obtener condiciones de temperatura y humedad relativa ambiente, representativas de las del ambiente interior de un edificio. Para este caso, solo se cubrió la mitad con el elemento vidriado debido a las dimensiones que poseía la fachada a ensayar; el resto de la superficie se completó con placas de madera y sellador.

La estructura está constituida por vigas principales, secundarias y columnas. Las vigas principales y las columnas están construidas con perfiles de acero mientras que las secundarias lo están con perfiles de chapa doblada. Las columnas se sustentan sobre apoyos móviles evitando de esta manera transferir esfuerzos de coacción a la fundación, la que fue ejecutada con bases aisladas. Presenta además cuatro vigas con rigidez adecuada para simular los entresijos de la estructura sobre las que se monta la fachada integral. Su posición es regulable verticalmente, permitiendo de esta manera adaptarlas a las distintas alturas de los entresijos de los edificios. La estructura fue diseñada para soportar presiones de hasta +/- 10 kPa.

El cerramiento está formado por paneles de 15 cm de espesor, constituidos por dos chapas de acero galvanizado exteriores y poliestireno expandido en su interior. Los mismos se apoyan en las vigas secundarias de la estructura, y confieren resistencia mecánica, estanquidad y aislación térmica a la Cámara de Ensayo.

La instrumentación empleada comprende los elementos que se detallan seguidamente:

- ✓ Dos piranómetros de precisión EPPLEY PSP, uno utilizado para la medición de la radiación incidente sobre plano vertical solidario con la fachada (I_v) y el otro para la medición de la radiación transmitida por la cara interior de la fachada en posición vertical (I_t).
- ✓ Un reflectómetro EKO Modelo MR-32, dispuesto en posición vertical enfrente a la cara externa de la fachada, para la medición de la radiación reflejada por la misma (I_r).
- ✓ Un sensor piranométrico LI-COR Modelo LI 200, utilizado para la medición de la radiación solar incidente sobre plano horizontal (I_h).
- ✓ Tres termohigrómetros marca HOBO, modelo H8-003-002 que permiten la adquisición automática y almacenamiento de datos de temperatura y humedad relativa, ubicados a diferentes alturas en el interior de la cámara de ensayos.
- ✓ Termocuplas de cobre/constantán para medición de temperaturas superficiales OMEGA sobre los paños vidriados.
- ✓ Registrador multicanal, marca Yokogawa, modelo 3081.
- ✓ Estación meteorológica Davis modelo Perception II, con accesorio para almacenamiento de datos y conexión a PC, modelo Weatherlink.
- ✓ Equipo Medidor de propiedades térmicas en régimen estacionario mediante el método de flujo de calor Dynatech modelo Rapid -k.



Foto 1: Cámara de ensayos con la fachada vidriada instalada.

Foto 2: Vista de la fachada vidriada bajo ensayo.



Foto 3: Vista del piranómetro ubicado en el interior de la cámara

Foto 4: Vista del reflectómetro desde el interior de la cámara



Foto 5: Piranómetro ubicado en plano vertical



Foto 6: Piranómetro sobre plano horizontal

RESULTADOS OBTENIDOS

Las mediciones se realizaron durante el mes de agosto, aprovechando la disponibilidad de la cámara de ensayos con una fachada vidriada instalada construida con paneles de Doble Vidriado Hermético. Durante el periodo de medición fueron analizados día por día la evolución que presentaba la curva de radiación solar incidente, con el objeto de establecer un criterio para determinar la energía solar total transmitida a través del elemento vidriado.

Al observar el registro de las irradiaciones solares se encontró que éstas eran sensibles a la posición del sol y a las condiciones de nubosidad, de tal manera que arrojaban valores totalmente aleatorios, donde no se podía encontrar una constancia en la relación de la radiación solar incidente y la radiación solar transmitida. De todos los días de medición se utilizaron los registros en los valores máximos de la radiación solar incidente sobre el plano vertical, de la transmitida y de la reflejada, en los que la variación de las mismas se encontraba en valores que oscilaran dentro de un rango $\pm 4\text{W/m}^2$, que es la resolución del registrador como mínima división. Además, se observó que los valores máximos que adoptaban los sensores se producían en distintos intervalos de tiempo, por lo que existía un periodo durante el cual las variables medidas se mantenían cuasi constantes, de manera tal de poder relacionarlas.

En la figura 3 se presenta a modo ilustrativo la evolución horaria de las irradiaciones solares medidas en uno de los días diáfanos seleccionado. En la misma se puede observar que existe un retraso de la radiación solar sobre el plano horizontal respecto de las otras tres radiaciones utilizadas en la aplicación del método descrito.

Del análisis se dedujo, que para poder determinar tal característica precitada, los únicos registros de radiación solar que podían utilizarse eran aquellos que correspondían a días totalmente diáfanos. Por tal motivo, solamente pudieron considerarse tres días que presentaron tales condiciones.

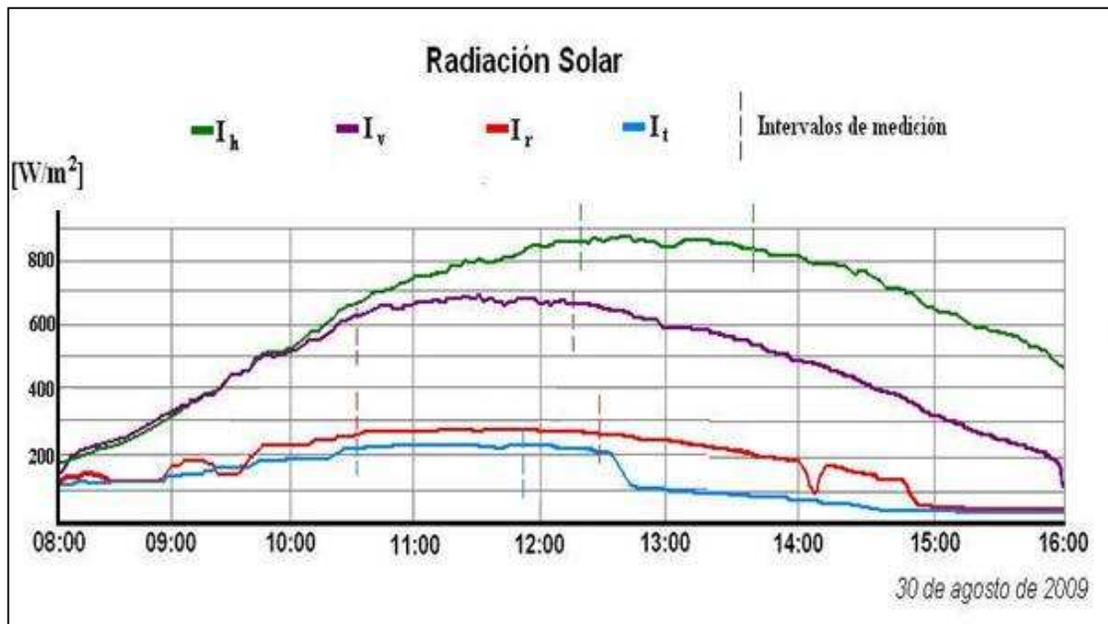


Figura 3: Evolución de las diferentes curvas de irradiación solar para un día diáfano.

Un comentario acerca del tratamiento dado a las mediciones de irradiación solar. Las mismas fueron medidas por sensores piranométricos cuya salida es en mV. Los datos fueron adquiridos y registrados sobre papel de impresión por un registrador multicanal, tanto en forma analógica de modo continuo como en forma digital indicados cada hora. Estos valores en mV fueron afectados por la constante de calibración de cada uno, obtenidos mediante las respectivas calibraciones realizadas por la División Radiación Solar San Miguel. De este modo, los valores de irradiación presentados en el trabajo, están expresados en W/m^2 .

En la Tabla 1, se presentan las mediciones de las magnitudes mencionadas con la incertidumbre correspondiente, especificando en cada una de ellas el horario en que fue determinado el valor promedio: Asimismo, se indican los resultados obtenidos para las magnitudes T y R en porcentaje.

Día	Horario	Iv W/m^2	Ir W/m^2	It W/m^2	Ih W/m^2	R %	T %
20/08	10:48 a 12:09	868 ± 30				39,3	30
	10:30 a 12:00		341 ± 13				
	10:30 a 12:12			266 ± 12			
	12:30 a 13:06				932 ± 11		
29/08	10:36 a 12:13	778 ± 15				40	29
	10:36 a 12:41		312 ± 8				
	10:36 a 12:03			227 ± 8			
	12:21 a 13:48				930 ± 14		
30/08	10:37 a 12:15	726 ± 15				40	28,6
	10:37 a 12:38		294 ± 8				
	10:37 a 11:53			207 ± 8			
	12:21 a 13:48				870 ± 14		

Tabla 1: mediciones de las irradiaciones solares incidentes, reflejada y transmitida y valores de transmitancia y reflectancia

Se observa en la Tabla 1, que los cálculos obtenidos en la determinación de la transmitancia y la reflectancia solar, presentan valores muy similares entre los diferentes días analizados.

TRANSMISIÓN TOTAL DE ENERGÍA SOLAR

Según lo expresado precedentemente, para determinar la transmisión total de energía solar cuando existe una diferencia de temperatura entre el aire interior y el aire exterior, se debe considerar el aporte dado por la transmisión de calor del elemento vidriado. Para ello, se debe determinar la transmitancia térmica de éste, pudiéndose obtener teóricamente o bien experimentalmente. En este caso, se optó por esta última alternativa, efectuando un ensayo sobre una probeta de 30 x 30 cm del panel de doble vidriado hermético utilizado en la fachada. El ensayo se realizó mediante el empleo de un equipo de medición que sigue los lineamientos establecidos en la norma ASTM C 518, que determina las propiedades térmicas de los materiales de construcción en régimen estacionario para las condiciones de temperatura que se pretenden analizar el elemento, obteniéndose el valor de conductancia térmica que resultó ser de $2,18 W/m^2.K$.

Temperaturas superficiales

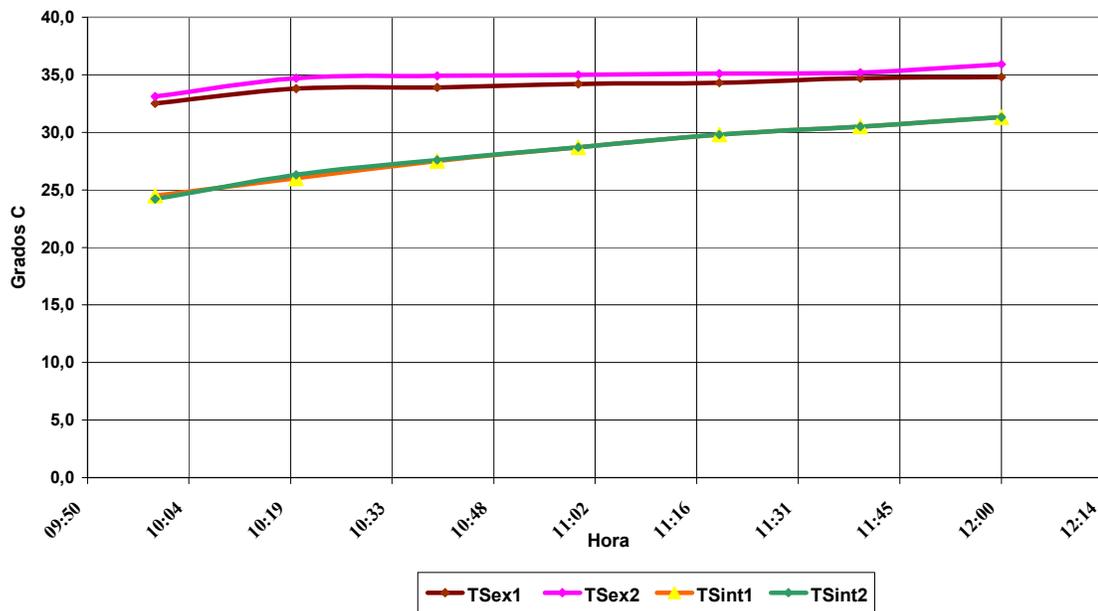


Figura 4: Temperaturas superficiales en ambas caras del elemento vidriado del día 30 de agosto.

Habiéndose registrado los valores de temperatura superficial tanto del lado exterior como del lado interior del elemento vidriado, se utilizaron aquellos que se correspondían con el período horario en que se evaluó el fenómeno de irradiación solar. Las temperaturas registradas para esos mismos días y horario muestran en la Tabla 2, mientras que en la figura 4 se da a título ilustrativo la evolución de esas temperaturas durante el intervalo de tiempo seleccionado para uno de los días de medición.

Día	Horario	T _{si} °C	T _{se} °C	ΔT _s °C	q _z W/m ²	I _t W/m ²	Φ _{ei} W/m ²
20/08	10:30 a 12:00	34,8	28,3	6,5	14,2	244	258
29/08	10:30 a 12:00	42,4	35,3	7,1	15,5	227	242
30/08	10:30 a 12:00	41,7	34,6	7,1	15,5	207	222

Tabla 2: Transmisión total de energía solar considerando el aporte térmico

En la Tabla 2, para cada día analizado se presenta la transmisión de calor del elemento vidriado (q_z) obtenido como producto de la conductancia térmica y la diferencia de temperatura superficial entre el lado exterior y el lado interior. Luego, este valor se suma a la energía solar transmitida hacia el interior del elemento vidriado (I_t) obteniéndose la transmisión total de energía solar Φ_{ei}.

CONCLUSIONES

Como primera conclusión, se encontró que el método descrito se puede aplicar solamente a aquellos días que son totalmente diáfanos, ya que permiten hallar una relación constante entre la irradiación transmitida y/o reflejada y la incidente total solar. Ya que de otra manera, las variables a medir presentan variaciones de tipo aleatoria que impiden efectuar la relación buscada.

No obstante, aunque el día se presente diáfano, se debió seleccionar el intervalo de medición donde las variaciones estén acotadas a una tolerancia de ± 4 W/m², de modo tal que represente un régimen cuasi estacionario para que resulte comparable con la distribución espectral obtenido mediante laboratorio.

Los valores máximos de cada irradiación solar medida cumplen con esta condición, pero es necesario encontrar aquel intervalo que sea común a todas ellas. Esta situación representa la condición más desfavorable de carga térmica solar a través del elemento hacia el interior de un edificio.

Una consideración a tomar en cuenta está referida a la orientación de la fachada, ya que para cada caso en particular se deberá encontrar el período de medición en que se cumplan los requisitos antes mencionados. Esto significa que el intervalo hallado para el caso analizado, es válido para la orientación y el día del año en que se hizo la medición. Para cualquier otra situación, se deberá obtener el intervalo correspondiente.

Como se observa en la Tabla 2, el aporte energético dado por la transmisión de calor incrementa pero no de manera significativa la transmisión total de energía solar, por lo que es importante destacar la determinación de la energía solar transmitida, que fue el objeto de este trabajo.

Como aplicación del método presentado, está prevista la realización de mediciones in-situ de irradiación solar en edificios existentes conteniendo carpinterías livianas en su fachada.

REFERENCIAS

- ISO 9050:2003. Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
- ASHRAE. Handbook of Fundamentals (2005)
- ASTM C 518:2004. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus

ABSTRACT: Knowledge of the incident solar component transmitted into the building through glazing is necessary for thermal energy analysis. There are calculation methods but we used a glazed facade installed in a 10 m x 10 m test chamber to make the experimental determination. Total incident solar irradiation measurements over horizontal and vertical planes were realized; also reflected and transmitted solar irradiations were measured during August 2009. Data selection had to be done for obtaining representative constant ratios for solar transmittance and reflectance during a defined time interval. A measurement method for determination of solar components under certain conditions for clear-sky day of measurement, orientation and interval of coincident maximum values, was established.

Keywords: Curtain wall, solar radiation, solar reflectance, solar transmittance, time interval